

# 構造が発達した自然堆積粘土地盤の盛土載荷に伴う長期・大沈下挙動の解析

名古屋大学 学生会員 田代むつみ

名古屋大学 国際会員 浅岡頭 中野正樹 野田利弘

## 1. はじめに

軟弱粘性土地盤での盛土工の設計・実務では、盛立て終了直後の安定問題さえ凌げば、後は盛立て時に発生した正の過剰水圧が消散するだけで、地盤は安定に向かうとされてきた。道路公団常磐自動車道神田地区の道路用盛土も、このような設計理念に基づいて「無処理」で施工された。しかし図-1<sup>1)</sup>のように、供用開始後20年以上経った今でもなお沈下が継続中で、当初の予測値を大幅に越す大沈下を示している。また、一旦収束に向かった沈下は、図中点線で示したオーバーレイとは関係なく沈下を速める現象が観測されている。なお、図中で、盛土完成前後で計測データが欠損しているため、その部分の前後の沈下～時間関係を元に補間し実線で示している。さらに、図-2の盛土中央直下15m付近で粘土層の間隙水圧の計測データが示すように、消散するはずの過剰水圧は逆に上昇傾向さえ示し、「圧密沈下=過剰水圧の消散」という、これまでの図式を疑わしくしている。

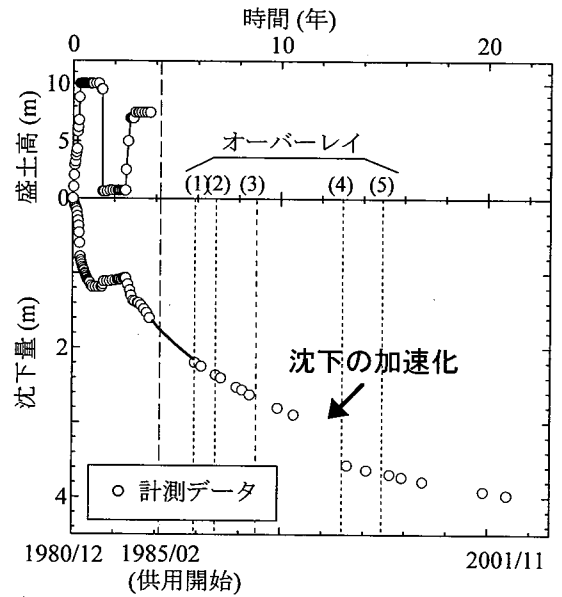


図-1 神田地区における長期・大沈下挙動

本論文では、当該地区でも最も沈下が顕著に観測された地点を対象に、現場採取試料から得られたパラメータ及び各種現場データを参考にして地盤構成、荷重条件等を再現し、長期・大沈下挙動を表現する。構成式には土の骨格構造<sup>2)</sup>(構造・過圧密・異方性)の働きを表現する弾塑性構成式であるSYSカムクレイモデル<sup>3)</sup>を用いて、水～土連成有限変形計算<sup>4)</sup>を行った。この計算事例から、長期・大沈下挙動は、構造の発達した自然堆積粘土層内で生じる水～土連成場での「構造を劣化させつつ進行する圧密」によるものであることを示す。また当該現場での施工履歴を参考に、長期・大沈下挙動に及ぼす各種要因として、①プレロード、②オーバーレイ、③SD(サンドドレーン)、④盛土荷重の増減、の影響を調べた。

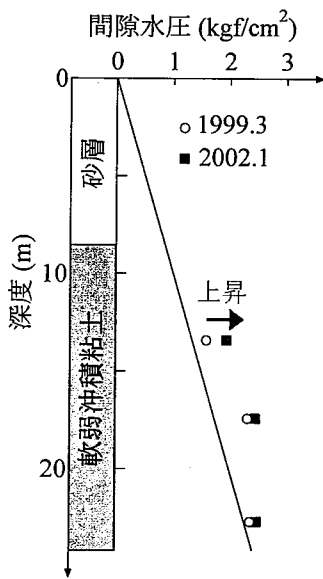


図-2 間隙水圧分布

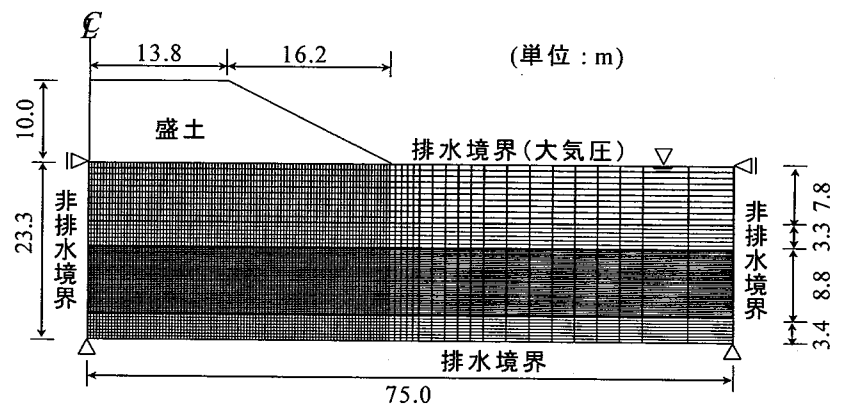


図-3 有限要素メッシュと境界条件

Delayed and large settlement behavior of highly structured clayey ground under embankment loading :

Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T. and Tashiro, M. (Nagoya Univ.)

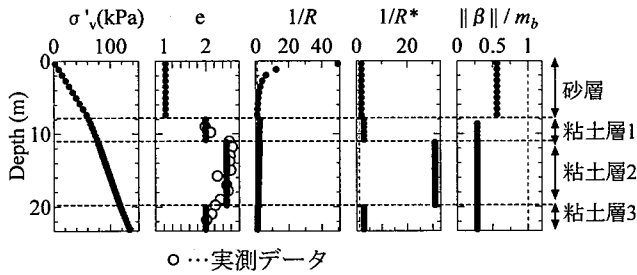


図-4 地盤の初期土性分布

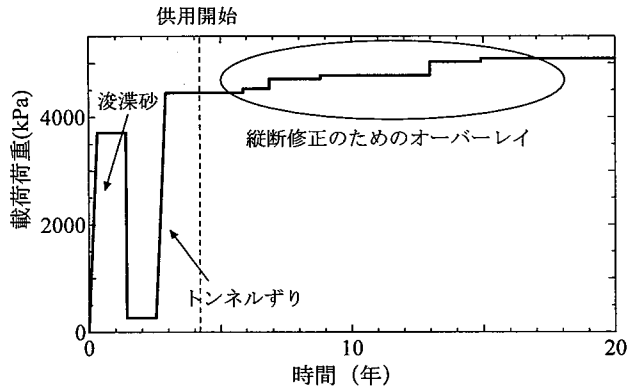


図-5 荷重条件

表-1 地盤の材料定数と初期値

	砂層	粘土層 1	粘土層 2	粘土層 3
<b>&lt;弾塑性パラメータ&gt;</b>				
圧縮指数 $\lambda$	0.05		0.28	
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.012		0.047	
限界状態定数 M	1.0		1.65	
正規圧密線の切片 N ( $p'=98\text{kPa}$ での練り返し土の正規圧密線上の比体積)	1.99		2.8	
ポアソン比 $\nu$	0.3		0.3	
<b>&lt;発展則パラメータ&gt;</b>				
構造低位化指数 a	2.63		0.013	
構造低位化指数 b	1.0		1.5	
構造低位化指数 c	1.0		1.0	
正規圧密土化指数 m	0.08		1.2	
回転硬化指数 $b_r$	0.514		0.01	
回転硬化限界定数 $m_b$	0.5		1.6	
<b>&lt;初期値&gt;</b>				
構造の程度 $1/R^*$	2.00	3.0	31.0	3.0
比体積 $v=1+e$	2.045	3.0	3.5	3.0
異方性の程度 $\zeta_0 = \sqrt{3/2} \ \beta_0\ $	0.231	0.375	0.375	0.375
応力比 $\eta_0 = q_0 / p'_0$	0.231	0.375	0.375	0.375
透水係数 k (cm/sec)	$4.1 \times 10^{-2}$		$7.4 \times 10^{-8}$	
土の密度 $\rho_s (\text{t/m}^3)$	2.65		2.58	

## 2. 計算条件

図-3 に計算に用いた有限要素メッシュと境界条件を示す。神田地区で見られる地層構成を考慮して、砂層の下に軟弱粘土層がある地盤を想定し、左右対称性を仮定して半断面を解析領域とした。地盤上端面（地表面）は水面と一致するように水圧を常にゼロとし、下端面は砂層の存在を考慮して排水境界とした。なお、十分に細かいメッシュを用いた結果（7616要素）、時間～沈下関係においてメッシュサイズ依存性はほとんど見られなかった。

計算に用いた地盤の材料定数と初期値を表-1 に示す。砂は中密な砂を想定し、粘土は現場採取試料を用いた室内試験結果<sup>5)</sup>と現場データを参考に、構造の発達した自然堆積粘土を想定した。地盤内の初期土性分布は、粘土層における間隙比の実測値をできるだけ忠実に再現するために、粘土層を粘土層1～粘土層3の3層に分割するとともに、間隙比、構造の程度、異方性の程度を各層内で一定と仮定し、土被り圧に応じて過圧密比を分布させた（図-4）。粘土層2は最も間隙比が高く、それに応じて構造の程度も大きい粘土とした。

荷重条件は、神田地区でも著しく沈下が観測された地点での荷重履歴を表現し、図-5のように設定した。供用開始前には、浚渫砂 ( $\gamma_t=1.7\text{t/m}^3$ ) からトンネルずり ( $\gamma_t=2.1\text{t/m}^3$ ) への盛土材変更に伴うプレロード、供用開始後には縦断修正のための5回のオーバーレイ（アスファルト材： $\gamma_t=2.35\text{ t/m}^3$ ）の再現も試みた。

## 3. 長期・大沈下の表現とメカニズム解明

図-6 に計算から得られた沈下挙動と、図中の(a)～(e)の時刻における盛土中央直下での過剰水圧の等時曲線を示す。比較のため、実測沈下曲線も併記した。沈下が進行中に沈下速度が急変し、その後長期に亘り沈下が続く様子が非常に類似している。計算では35年まで沈下が継続し、最終沈下量は約4.7mとなった。図中点線で示したオーバーレイによる舗装荷重は、全荷重荷重の12.5%に相当するが、これが沈下の加速化や長期・大沈下の直接の原因でないことは次章で示す。図中には時間軸をlog scaleで表したものも示すが、構造の発達した自然堆積粘土の圧密沈下は、決してextension curveのようにスムーズに進行するのではないことがわかる。過剰水圧の等時曲線では、構造が高位な粘土層2において、図中矢印で示した箇所で水圧の上昇

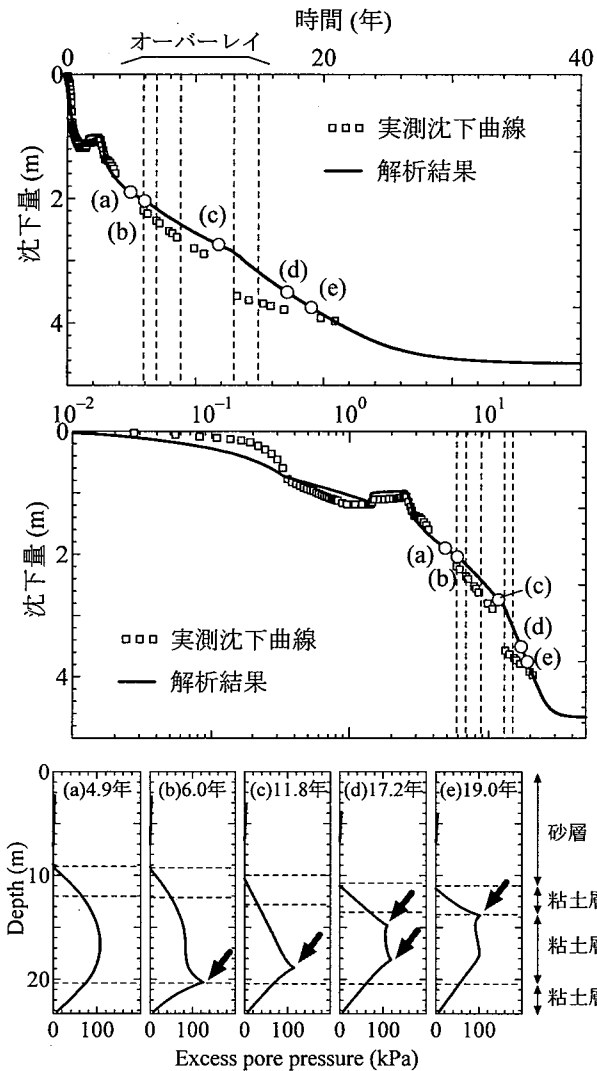


図-6 盛土中央直下での時間～沈下量関係と過剰間隙水圧分布（ $\blacktriangledown$ :水圧の湧出し）

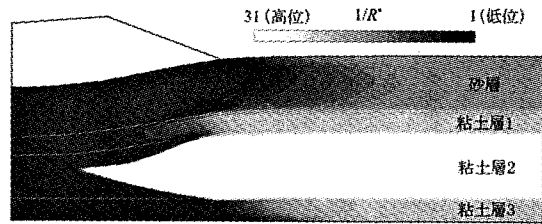


図-7 圧密終了時（35年）の構造の分布図

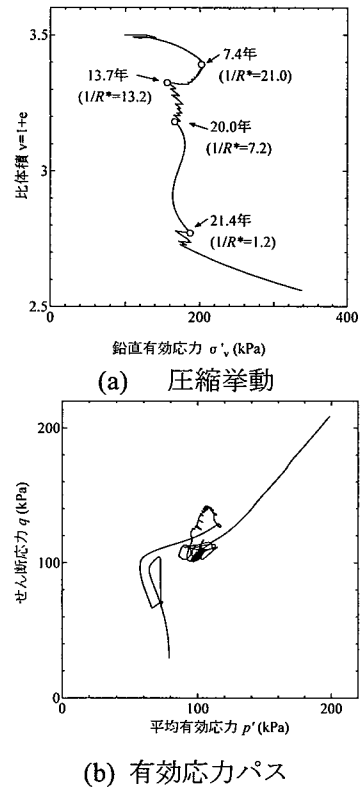


図-8 要素の挙動（盛土中央直下、粘土層2中央）

（湧出し）が観測され、これも図-2の観測事実とよく一致している。本計算においては、水圧の湧出しは粘土層2でも拘束圧が高く排水層に近い下端より突如始まり、その後他の要素にも不規則に伝播していく様子が観測された。なお本計算で想定した粘土層1~3はすべて同じ材料であるにもかかわらず、初期骨格構造が非常に発達した粘土層2のみで水圧の上昇が起こる。

構造が高位な粘土（粘土層2）では、過圧密が解消し見かけの圧密降伏応力を超える有効応力状態に達したあたりから、構造の破壊（低位化）が顕著に起こる。図-7には、圧密終了時（35年）の地盤内部の構造の分布を示すが、粘土層2の内部まで激しく構造の破壊（劣化）が進行している様子が分かる。またこの時、構造劣化に起因して、圧縮軟化により平均有効応力の減少が生じると、粘土は透水係数が小さく水圧の消散が遅いため、過剰水圧の上昇が起こる。この結果、沈下は加速化して長期化する。このように、ある粘土要素で平均有効応力の減少と水圧の上昇が起こると、その影響を受けて周辺土要素でも除荷・負荷（間隙水圧の上昇・消散）過程を繰返し受ける。図-8には、盛土中央直下の粘土層2の中央要素の挙動を示す。この要素は、周辺土の構造破壊の影響を受けて小さな応力振幅でゆっくりと比体積の減少を示した後、その要素自身の構造破壊により圧縮を伴う軟化を顕著に生じ、大圧縮を示している（「粘土の締固め」）。このように、骨格構造が発達した自然堆積粘土では、たとえ荷重一定放置中でも複雑な応力履歴が発現し、予想以上の沈下を引き起こす可能性があることがわかる。

#### 4. 長期・大沈下挙動に及ぼす各種要因

ここでは、長期・大沈下挙動に及ぼす要因として、①プレロード、②オーバーレイ、③SD（サンドドレーン）、④盛土荷重の増減（①～③は神田地区でも実施）の4つについて、水～土連成計算により調べ、その影響を示す。

##### ①プレロードの影響

長期・大沈下が最も顕著に観測された箇所では、図-1に示すように、砂からトンネルずりへの盛土材の変更を目的としたプレロードが実施された。その影響を確認したのが図-9である。プレロードの効果を顕著にするために、オーバーレイは計算では実施していない。また、最終的な盛土荷重、及び載荷終了時刻が等しくなるように、プレロードが無い場合の載荷履歴を与えた。当該現場で行われたプレロードは、軟弱粘土地盤の長期・大沈下に対して、沈下の早期安定化には効果がなく、逆に最終沈下量を大きくしてしまう結果となった。プレロード荷重（浚渫砂）よりもその後の荷重（トンネルずり）の方が大きいことも原因のひとつと考えられる。

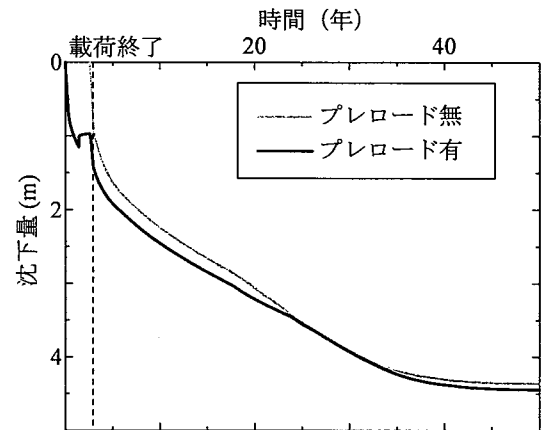


図-9 プレロードの影響

##### ②オーバーレイの影響

神田地区では供用開始後に大きな残留沈下が発生したため、繰り返しオーバーレイが実施された。図-1で示した箇所では、5回の舗装荷重の合計は盛土荷重の14%にも相当する。その影響を図-10に示す。図中点線で示した箇所でオーバーレイを実施した。当該沈下の特徴である「沈下の加速化」はオーバーレイが無い場合でも観測され、オーバーレイが直接の原因では無いことが分かる。またオーバーレイの実施により最終沈下量は大きくなるが、地盤の構造劣化を促進させ沈下の収束を早める結果となった。

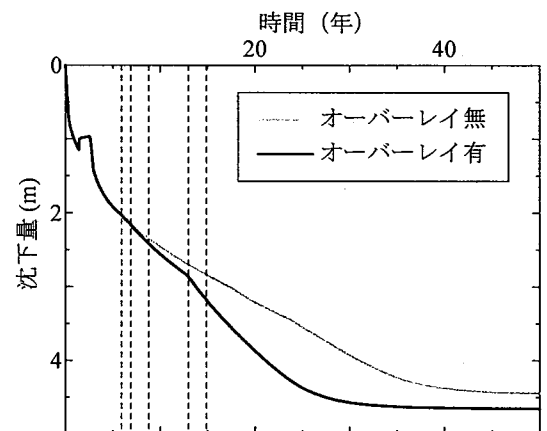


図-10 オーバーレイの影響

##### ③サンドドレーンの影響

神田地区では本工事に先駆けSD打設の有用性を調べる目的で試験盛土の実施がなされたが、当初は明確な効果が得られなかったために一部の区間を除いてSD対策は行われなかった。しかし図-11の実測データが示すように、無処理部（図-1 該当箇所）に比べてSD対策部では沈下の収束が早く、供用開始後の残留沈下量を小さく抑える結果となった。縦断修正のための現在までのオーバーレイの回数も、無処理部では5回（修正舗装厚合計:125.9cm）に対し、SD対策部では1回（修正舗装厚合計:15.8cm）である。

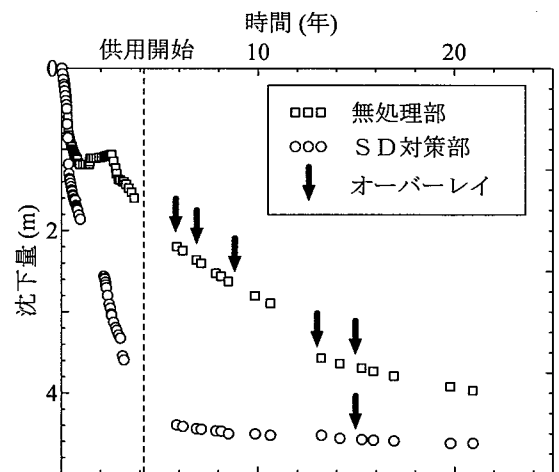


図-11 サンドドレーンの影響（実測）

そこで両試験盛土の載荷履歴を再現し、SDの影響を計算により確認した。SD打設によるマスパーミアビリティ（地盤全体の透水性）の改善は $10^2 \sim 10^1$ である<sup>6)</sup>。本論文ではこれに基づき、試験盛土で打設されたドレーン長に相当する粘土層の透水係数を100倍にすることでSD打設効果を表現した。砂杭貫入などの施工過程は考慮していない。

計算では無処理部とSD対策部の両試験盛土の載荷履歴は図-12のように設定した。SD対策部では浚渫砂で一度載荷された後は、供用開始時に所定の盛土高になるようにトンネルずりによる余盛を実施した。オーバーレイも各試験盛土における舗装履歴を基に再現を試みた。

図-13に計算結果を示す。計算でも実測と同様に、SD打設により沈下の収束が早まり地盤の早期安定化に有効である結果が得られた。なお最終沈下量はSD打設部がやや小さくなったが、これは図-12に示すようにSD打設部の方がオーバーレイによる舗装荷重が小さく最終荷重も小さいためであると考えられる。SD打設は最終沈下量に影響が無く、大沈下の防止には有効ではない。

#### ④盛土荷重の影響

図-14に盛土高を変更した場合の沈下挙動の比較を示す。載荷速度はすべて等しく、載荷日数の違いにより盛土高の違いを表現した。今回の想定地盤では、盛土高が7mまで低く盛土荷重が小さい場合には沈下の加速化が見られなくなり、沈下量も小さく早期に圧密が終了した。また、これより1m高い盛土高8mの場合は、非常に長期に亘りダラダラと沈下が継続し、圧密終了までに約200年かかる結果となった。図-15には、盛土高7mと8mの場合の、圧密終了時における地盤内部の構造の分布図を示す。盛土高8mの場合は、高位な構造を有する粘土層2の深部まで構造破壊（劣化/低位化）が進行しているが、盛土高7mの場合には、粘土層2の構造はほとんど破壊していないことが分かる。このように長期・大沈下挙動に対してはある閾値となる荷重が存在し、それよりも小さな荷重にすることで長期・大沈下の防止ができる。実際の施工上盛土高に制限がある場合は、発砲スチロール(EPS)、発泡廃ガラス材(FEG)<sup>7)</sup>などによる軽量盛土の採用が有効である。

盛土高がさらに大きい10mの場合は、最終沈下量は大き

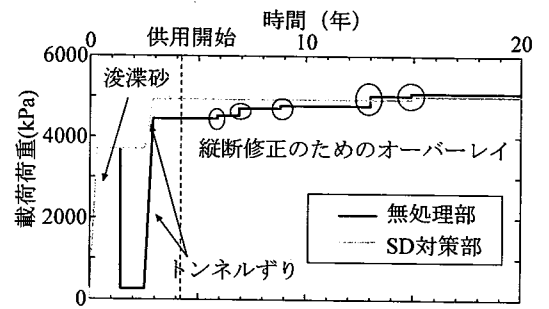


図-12 載荷条件

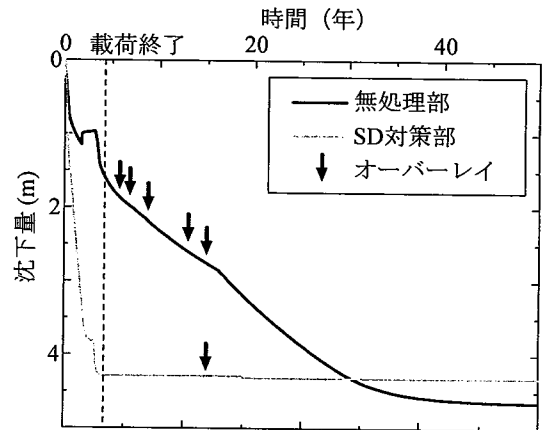


図-13 サンドドレーンの影響(解析)

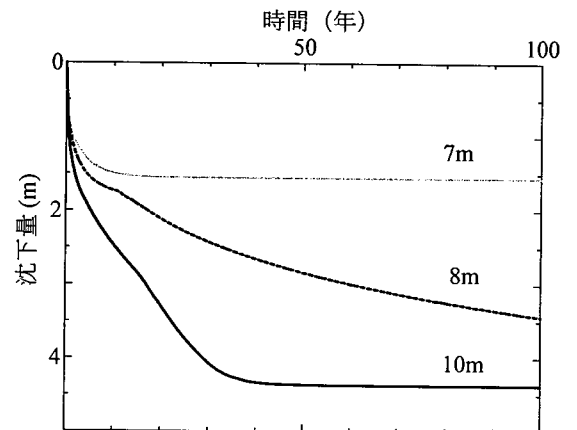
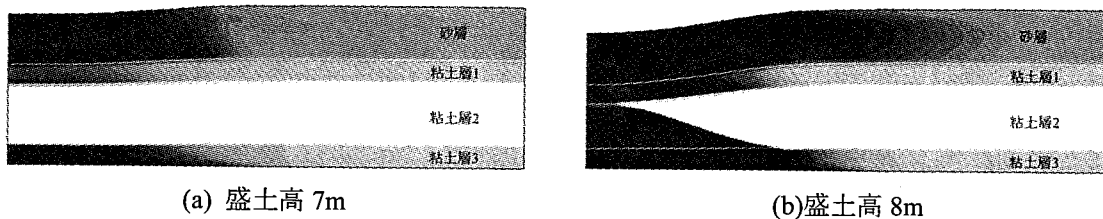


図-14 盛土荷重の影響



(a) 盛土高 7m

(b) 盛土高 8m

31 (高位) 1/R\* 1 (低位)

図-15 圧密終了時の構造の分布

くなるが構造破壊が促進されるために沈下の収束は早くなる。これは図-10においてオーバーレイを実施した地盤の方が沈下の収束が早いことと一致する。閾値を超える荷重を載荷してしまった場合は、大きな荷重を載荷して早く構造破壊を進めることも有効であると考えられる。しかしあまり大きな荷重を載荷した場合には、図-16の地盤内の変位速度場が示すように、粘土層内で円弧滑り破壊が生じてしまうので注意が必要である。

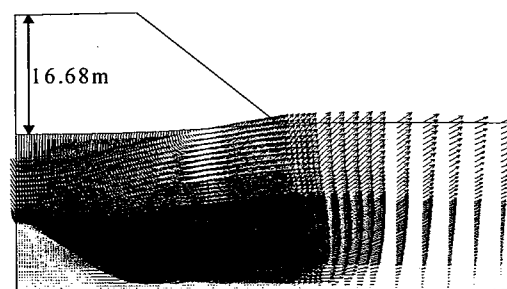


図-16 変位速度場（円弧滑り破壊）

## 5. まとめ

常磐自動車道神田地区の盛土載荷地盤で観測された長期・大沈下挙動に対し、類似の傾向を水～土連成弾塑性計算を用いて示した。また当該現場の施工履歴を基に、長期・大沈下挙動に及ぼす各種要因について考察した。本論文より得られた結論を以下に示す。

- ・骨格構造が発達した粘土地盤では、圧縮を伴う軟化が顕著に生じた結果、平均有効応力の減少が起こる。この時、粘土は透水係数が小さく水圧の消散が遅いため、過剰水圧の上昇が起こる。
- ・この現象が、構造が発達した粘土層内で連続的に起こるため、粘土要素は間隙水圧の上昇・消散過程を繰返し受けてさらに構造が低位化し（「粘土の締固め」）、大沈下をもたらす。
- ・当該現場で行われたプレロード工法は、沈下の早期安定化には効果がなく、逆に沈下量を大きくした可能性がある。
- ・繰返し行われたオーバーレイは、当該現場で観測された沈下の加速化の直接の原因ではないが、沈下量を大きくする結果となった
- ・SD 打設は沈下の収束を早め、地盤の早期安定には有効であるが、長期・大沈下は防止できない。
- ・軽量盛土などによる荷重の低減により、長期・大沈下は防止できる。
- ・大きな荷重を載荷することで、構造の劣化を促進し沈下の収束を早めることはできるが、地盤の破壊を引き起こす可能性もある。

## 参考文献

- 1) 竜田尚希, 稲垣太浩, 三嶋信雄, 藤山哲雄, 石黒健, 太田秀樹(2003) : 軟弱地盤上の道路盛土の供用後長期変形挙動予測と性能設計への応用, 土木学会論文集 No.743/III-64, pp.173-187.
- 2) 三笠正人(1964) : 土の工学的性質の分類表とその意義, 土と基礎, Vol.12, No.4, pp.17-24.
- 3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, T., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002) : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57.
- 4) Asaoka, A., Nakano, M., and Noda, T. : Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.1, pp.13- 28, 1997.
- 5) 野田利弘, 中野正樹, 浅岡顕, 田代むつみ, 稲垣太浩, 伊藤拓磨 (2004) : 常磐粘土の力学特性と SYS カムクレイモデルによる弾塑性・発展則パラメータの決定, 第 39 回地盤工学研究発表会.
- 6) 浅岡 顕, 中野正樹, 松尾 稔 (1993) : 観測的方法による透水係数の推定を組込んだプレロード工の予測計算の一試案, 土木学会論文集, No.469/III-23, pp.45-54.
- 7) 原裕, 鬼塚克忠, 原眞由美, 安高進 (2003) : 環境に配慮した斜面災害の修復－発泡廃ガラス材を用いた事例－, 土と基礎, 51-9, pp.27-29.